

0721710-1

На правах рукописи

**Юшко Сергей Владимирович**

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТУРБУЛЕНТНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ  
(КРУГЛЫХ) КАНАЛАХ, ОСЛОЖНЕННЫЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПРОДОЛЬНЫМ  
ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ И НЕИЗОТЕРМИЧНОСТЬЮ ТЕЧЕНИЯ.  
ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДОВ НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ**

**05.14.04. – Промышленная теплоэнергетика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

КАЗАНЬ - 2001

Работа выполнена на кафедре автоматизации и информационных технологий Казанского государственного технологического университета.

Научный консультант

- доктор технических наук,  
профессор А.В. Фафурин.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук,  
профессор Н.Н. Ковальников.

**НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ**



- доктор технических наук,  
профессор Э.Ш. Теляков.

- доктор технических наук,  
профессор М.И. Михеев.

Ведущая организация

- Московский государственный  
технический университет им. Н.Э. Баумана.

Защита состоится « 15 » июня 2001 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 в Казанском государственном технологическом университете, по адресу: г. Казань, ул. К. Маркса, 68.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан « 14 » мая 2001 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета д.т.н., профессор

С.И. Поникаров

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Проектирование, создание и эксплуатация предприятий теплоэнергетического комплекса (ТЭЦ, ГРЭС), а также отдельных агрегатов, входящих в их состав: паро- и газогенераторы, турбины, печи, котлы, теплообменники и др. - требует составления и решения уравнений материального и теплового баланса. Это позволяет определить основные энергетические и экономические характеристики объектов, такие как: КПД, потери тепла, издержки на топливо, удельный расход топлива на единицу выпускаемой продукции, себестоимость тепловой и электрической энергии и т.д. Указанные параметры лежат в основе производственно-хозяйственной деятельности предприятий теплоэнергетического комплекса. В этой связи, повышение требований к учету расходования энергетических ресурсов предприятий является важной задачей, направленной на повышение эффективности их деятельности в современных условиях хозяйствования.

Непрерывный рост цен на энергоносители, связанный, в том числе, с уменьшением запасов природного газа и нефти, заставляет ужесточать требования к учету их расходования. Данная задача не может быть положительно решена без разработки новых, более совершенных методов и средств измерения расхода жидкости и газа, что неразрывно связано с изучением гидро- и газодинамических процессов, реализующихся на практике.

Кроме того, повышение эффективности турбинных агрегатов, компрессоров, регенераторов, теплообменных аппаратов и др. систем, также связано с необходимостью изучения особенностей течений, реализующихся в их проточных частях.

В большинстве случаев течения носят нестационарный турбулентный характер, обусловленный как режимом эксплуатации агрегатов, так и их конструктивными особенностями. При этом часто гидродинамическая нестационарность является причиной возникновения тепловой нестационарности, что дополнительно осложняет структуру потока.

Возвращаясь к расходомерии необходимо сказать, что в настоящее время измерение расходов жидкостей и газов на территории Российской Федерации регламентируется нормативными документами, положения которых являются справедливыми для турбулентных стационарных течений. Применение же положений этих документов в условиях реальных течений приводит к возникновению дополнительных погрешностей измерения расхода, обусловленных непринятием в расчет нестационарного характера течения. Данные погрешности являются одной из причин небалансов, возникающих между поставши-

ками и потребителями энергоресурсов, которые наносят ущерб хозяйственной деятельности предприятий.

Настоящая работа посвящена изучению нестационарных турбулентных течений в осесимметричных (круглых) каналах, а также связанных с этим особенностями измерения нестационарных расходов. В работе содержатся сведения по кинематической структуре турбулентных течений, осложненных действием наложенных периодических колебаний расхода, отрицательным продольным градиентом давления, а также неизотермичностью течения. Рассмотрены эффекты, возникающие в потоках, как при раздельном, так и при совместном влиянии указанных возмущающих факторов.

### **Цель работы**

Основной целью настоящей работы являлось экспериментальное изучение кинематической структуры турбулентных течений жидкости и газа в осесимметричных (круглых) каналах, осложненных действием наложенных периодических колебаний расхода, отрицательного продольного градиента давления и неизотермичности течения. Более детальная формулировка сводилась к следующему:

1. Провести экспериментальные исследования воздействия наложенных периодических колебаний расхода на кинематическую структуру турбулентного пограничного слоя в осесимметричных, круглых каналах.
2. Установить причину возникновения и определить основные характеристики эффекта «памяти» турбулентности пограничного слоя потока, осложненного наложенными периодическими колебаниями расхода.
3. Экспериментально исследовать влияние отрицательного продольного градиента давления и неизотермичности течения, в потоках, осложненных периодическими колебаниями расхода.
4. Провести изучение характера течения, реализуемого на участках измерения расхода, промышленных узлов учета природного газа.
5. Оценить влияние периодических колебаний расхода и неизотермичности течения на метрологические характеристики стандартной диафрагмы и осредняющей напорной трубки (ОНТ).
6. Указать расходомерные устройства, способные играть роль образцовых средств измерения нестационарных расходов.
7. По результатам проведенных исследований указать приоритетные направления в изучении нестационарных турбулентных течений, сделать рекомендации практи-

ческого характера по измерению нестационарных расходов жидкостей с помощью стандартных диафрагм и ОИГ.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключалась в том, что в ней впервые были проведены комплексные экспериментальные исследования НТТ в осесимметричных (круглых) каналах, осложненных действием ряда практически важных возмущающих факторов: отрицательного продольного градиента давления и неизотермичности течения. В работе приведены данные по кинематической структуре нестационарного турбулентного пограничного слоя. Рассматриваются как осредненные, так и пульсационные характеристики течения.

На основе изучения микроструктуры течения впервые предложен метод обобщения и расчета турбулентного пограничного слоя газового потока, осложненного наложенными периодическими колебаниями расхода, основанный на параметрическом подходе с учетом динамических свойств пограничного слоя. Данный подход, кроме этого, позволил указать дальнейшие направления в изучении турбулентных течений, осложненных периодическими колебаниями расхода.

Изучение динамических характеристик нестационарного турбулентного пограничного слоя в периодически колеблющихся потоках впервые позволило сформулировать механизм эффекта «памяти» турбулентности, определить его основные характеристики.

### **Практическая ценность работы**

В результате настоящей работы на основе данных по кинематической структуре НТТ, а также результатов натурных исследований были определены основные направления метрологической оценки измерения нестационарных расходов жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Получены и опробованы соотношения, позволяющие корректировать измеренное значение нестационарного расхода жидкости при использовании квазистационарного подхода методом переменного перепада давления для стандартной диафрагмы. Также создан портативный диагностический комплекс, выполненный на базе персонального компьютера типа Note Book, предназначенный для изучения характера течения, реализуемого на участках диафрагмирования узлов учета природного газа. Использование данного комплекса на практике позволило установить характер течения и оценить погрешность измерения расхода, вызванную неучетом нестационарного характера течения на участках диафрагмирования узлов учета природного газа ряда промышлен-

ных предприятий Югтрансгазовской, Таттрансгазовской групп транспортных трубопроводов, а также ряда промышленных предприятий Татарстана.

Создана установка для проведения проверок расходомерных устройств, в нестационарном турбулентном потоке в условиях неизотермичности течения. Разработаны соответствующие методики выполнения измерений.

На основе анализа кинематической структуры турбулентного пограничного слоя предложена беспробивная методика нормировки коэффициента расхода ОНТ, основанная на анализе ее геометрии. Предложен вариант ОНТ для измерения расходов турбулентных потоков, осложненных периодическими колебаниями расхода.

Результаты работы приняты государственным научно-метрологическим центром всероссийского научно-исследовательского института расходомерии (ГНМЦ ВНИИР) и послужили основой для создания ряда нормативных документов.

Основные результаты работы реализованы в ЗАО Таттрансгаз, ОАО Нижнекамск-нефтехим, ВНИИР.

#### **Достоверность полученных данных**

Достоверность полученных данных обеспечивалась использованием аттестованных средств измерения, автоматизированных измерительных систем, реализацией соответствующих методик обработки информации, основанных на статистическом подходе, пошаговом подходе при организации исследований, а также сопоставлением полученных данных с результатами других авторов. Основные результаты работы опробованы и нашли подтверждение на практике.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований по влиянию периодических колебаний расхода, а также отрицательного продольного градиента давления и неизотермичности течения на кинематическую структуру турбулентного потока в осесимметричном (круглом) канале.
2. Обоснование эффекта «памяти» турбулентности.
3. Реализация параметрического подхода с учетом инерционных характеристик турбулентного пограничного слоя, при проведении обобщений и расчетов его основных характеристик.
4. Методики поверки расходомеров в нестационарном турбулентном потоке.

5. Рекомендации по измерению нестационарных расходов методом переменного перепада давления с помощью стандартной диафрагмы, а также ОНТ.

6. Методика нормировки коэффициента расхода ОНТ, основанная на анализе ее геометрии.

7. Зависимости, позволяющие корректировать измеренное значение нестационарного расхода методом переменного перепада давления с помощью стандартной диафрагмы при использовании квазистационарного подхода.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на следующих научно-технических конференциях:

- Отчетные научно-технические конференции КИТУ (КХТИ) (1998-2001 гг.).
- Международная конференция «Математические методы в химии и химической технологии». Тула. 1996 г.
- IV-я конференция по интенсификации нефтехимических процессов «Нефтехимия-96». Нижнекамск. 1996 г.
- Научно-технические семинары «Внутрикамерные процессы в энергетических установках. Акустика, диагностика». КВАКИУ им. М.Н. Чистякова. Казань 1998, 1999 гг.
- 11-я международная научно-техническая конференция по компрессорной технике. С.-Петербург 1998 г.
- Вторая международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях. Санкт-Петербург 1998 г.

### **Публикации**

Основные результаты исследований изложены в 31 научном труде, опубликованном в отечественной и зарубежной печати.

## **Содержание работы**

Нестационарные турбулентные течения, их кинематическая структура, процессы, протекающие в ядре потока и его пограничном слое, являются объектом пристального внимания исследователей уже на протяжении многих лет. Однако до настоящего времени этот класс течений остается малоизученными и нередко, даже в качественном плане.

Во многом это объясняется обширностью проявлений НТТ на практике, что обуславливает разрозненность проводимых исследований.

С другой стороны, сложность и многообразие эффектов, вызванных гидродинамической нестационарностью, затрудняет создание некоторых универсальных обобщающих критериев, способных адекватно описывать НТТ в различных условиях. Непонимание даже с качественной стороны процессов, протекающих в НТТ, не позволяет выделить приоритетные направления в изучении данного класса течений. Простое же накопление банка экспериментальных данных для дальнейшего анализа НТТ и отладки математических моделей, как показало время, является малоэффективным.

В настоящей работе была предпринята попытка комплексного подхода к изучению НТТ в осесимметричных (круглых) каналах. Суть подхода заключалась в совместном анализе фундаментальных основ явлений, происходящих в НТТ, а также их проявлений на практике, в частности при решении проблем трубопроводного транспорта, и связанных с расходомерией. Практическая сторона данного вопроса, кроме того, повлияла и на выбор дополнительных возмущающих факторов: отрицательного, продольного градиента давления и неизотермичности течения, а также диапазонов их изменения.

В соответствии с задачами исследования были разбиты по направлениям:

- исследования НТТ в круглой трубе в условиях изо и неизотермического потока ( $Re=5 \cdot 10^4 \div 1.1 \cdot 10^5$ ,  $T_w = 293 \div 355^\circ K$ ,  $\psi = \frac{T_w}{T_f} = 1 \div 1.1$ ,  $f=3 \div 10$  Гц,  $Am < 30\%$ );
- исследования НТТ в коническом конфузоре и конфузоре Витошинского в изотермических условиях ( $Re=5 \cdot 10^4 \div 1.1 \cdot 10^5$ ,  $\psi = 1$ ,  $f=4 \div 8$  Гц,  $Am < 13\%$ ,  $grad(p) = -3 \div -35$  кПа/м);
- изучение характера течений на участках диафрагмирования узлов коммерческого учета природного газа;
- исследования особенностей измерения расхода нестационарного турбулентного потока газа с помощью стандартных сужающих и напорных устройств в изо и неизотермических условиях.

Работы в каждом направлении проводилось на специально разработанных и изготовленных газодинамических стендах, некоторые из которых представлена на рис. 1, 10, 13. Функциональные особенности каждого из стенда будут рассмотрены ниже. Общее, что объединяло стенды, являлась автоматизированная система сбора и переработки информации (АССПИ), основной задачей которой являлась регистрация и предварительная обработка показаний датчиков. Использование АССПИ при проведении исследований повышало достоверность экспериментальной информации за счет уменьшения влияния на ре-



зультат человеческого фактора. Нижний уровень АССПИ составляли первичные преобразователи давления, температуры и скорости потока. Измерение давления потока осуществлялось датчиками дифференциального давления «Сапфир», ЕJA, Taylor и ДМИ. Последний отличался высокой чувствительностью к колебаниям давления и имел 99% полосу пропускания до частоты 100 Гц. Измерение температуры осуществлялось хромель-капелевыми термодарами в металлокерамической оболочке с толщиной спая и основного провода 85 мкм. Измерение скорости потока осуществлялось с помощью термоанемометра постоянной температуры в комплекте со специально разработанным и изготовленным датчиком. Чувствительный элемент датчика – позолоченная вольфрамовая нить толщиной 5 мкм. На верхнем уровне АССПИ использовался персональный компьютер типа IBM PC со специально разработанными устройствами связи с объектом (УСО). В каждом конкретном случае в зависимости от задач эксперимента использовались УСО различного быстродействия.

Основным исследованием предшествовал этап предварительных испытаний первичных преобразователей. При этом изучались особенности функционирования датчиков давления, температуры, а также термоанемометра в условиях исследуемых потоков, проводилась сертификация образцовой техники. В частности, на государственном рабочем эталоне давления, во всероссийском научно-исследовательском институте метрологии и стандартизации, (г. Москва) были испытаны цифровые манометры, которые использовались в настоящей работе в качестве образцовых (класс точности 0.02) при проведении калибровок датчиков давления и термоанемометра.

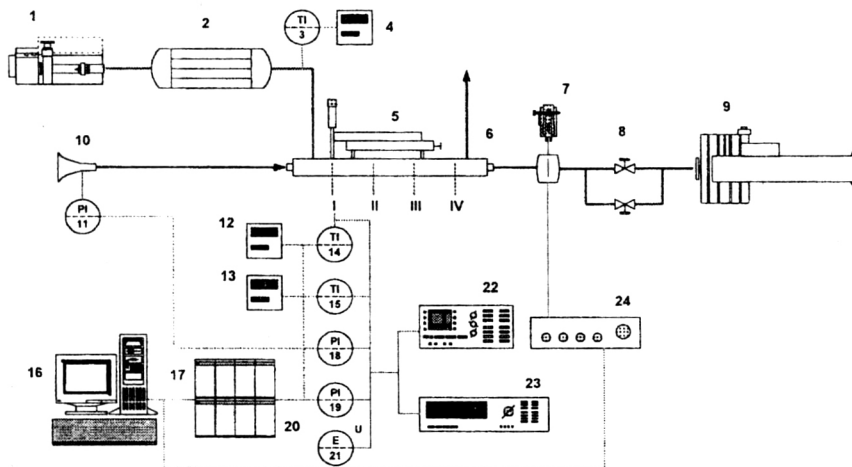
Результатом данного этапа явилась подробная метрологическая оценка каждого из используемых первичных преобразователей, а также рекомендации по их применению.

Исследования НТТ в круглой трубе проводилось на специально разработанном газодинамическом стенде разомкнутого типа, схема которого представлена на рис. 1.

Воздух из комнаты засасывался центробежным насосом, проходил сопло Витошинского, участок начальной стабилизации потока, рабочий участок, байпас, пульсатор и выбрасывался наружу. Рабочий участок – медная труба в рубашке, через которую прокачивался нагретый воздух. По длине рабочего участка были выполнены четыре сечения, в каждом из которых размещались трубки отбора статического давления, термодары для измерения внутренней поверхности стенки канала, а также гермогнездо для ввода в поток трубки Пито, датчика термоанемометра и термодары для измерения температуры потока.

Суть настоящих исследований заключалась в определении и анализе мгновенных и осредненных полей температур и скоростей потока по сечению канала, а также их инте-

гральных характеристик в условиях влияния наложенных периодических колебаний расхода и неизотермичности течения. Рассматривались: толщина вытеснения  $\delta^*$  и потери импульса  $\delta^{**}$ , формпараметр  $H$ , коэффициент трения  $C_f$ , а также интеграл безразмерного профиля осредненного квадрата пульсационной скорости потока.



1 – воздушный компрессор, 2 – печь, 3, 14, 15 – термopа. 4 – контроллер UM-350, 5 – координатный стол, 6 – рабочий участок, 7 – пульсатор, 8 – байпас, 9 – центробежный насос, 10 – сопло Витовского, 11 – датчик дифференциального давления «Сапфир» (ЕА), 12 – контроллер UT-550, 13 – контроллер UP-750, 16 – персональный компьютер. 17 – нормирующие усилители, 18, 19 – датчик ДМИ, 20 – УСО, 21 – термоанометр, 22 – осциллограф, 23 – цифровой вольтметр, 24 – источник постоянного тока для маркера.

**Рис.1. Схема экспериментальной установки**

Исследования были разбиты на два этапа: исследования в стационарном и нестационарном турбулентном потоке. Результаты исследований на первом сравнивались с результатами ряда классических работ, таких авторов как: Лауфер, Никурадзе, Кутателадзе, Леонтьев. При этом отлаживались методики ведения эксперимента и выполнения измерений, находились зависимости, позволяющие в дальнейшем производить расчет пограничного слоя в квазистационарном приближении. Кроме того, реализация данного подхода позволяла оценить величину случайной составляющей погрешности определения названных выше интегральных характеристик пограничного слоя от одной серии исследований к другой. Следует сказать, что такой подход использовался и в дальнейшем. В частности, на рис. 2 ÷ 4 представлены данные по профилю осредненной составляющей скорости потока,

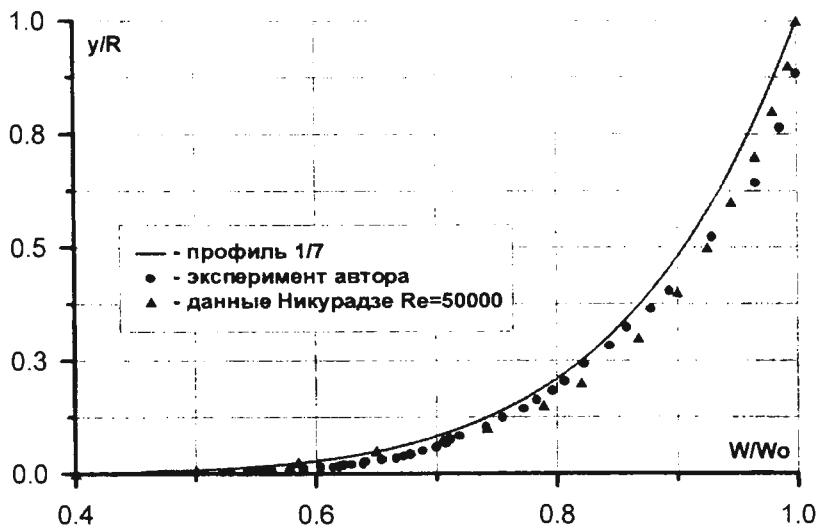


Рис.2. Профиль осредненной составляющей скорости потока в круглой трубе

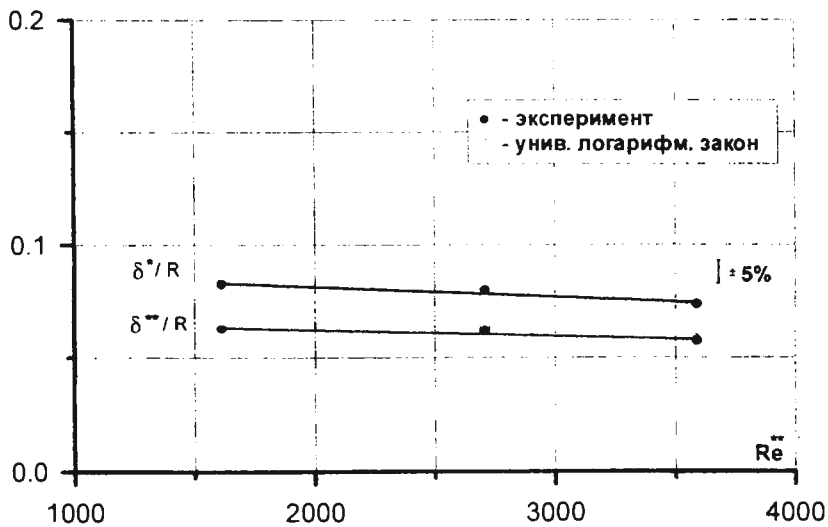


Рис.3. Толщина вытеснения и потери импульса в круглой трубе

толщине вытеснения и потери импульса, а также коэффициенту трения с данными других авторов. Видно удовлетворительное согласование.

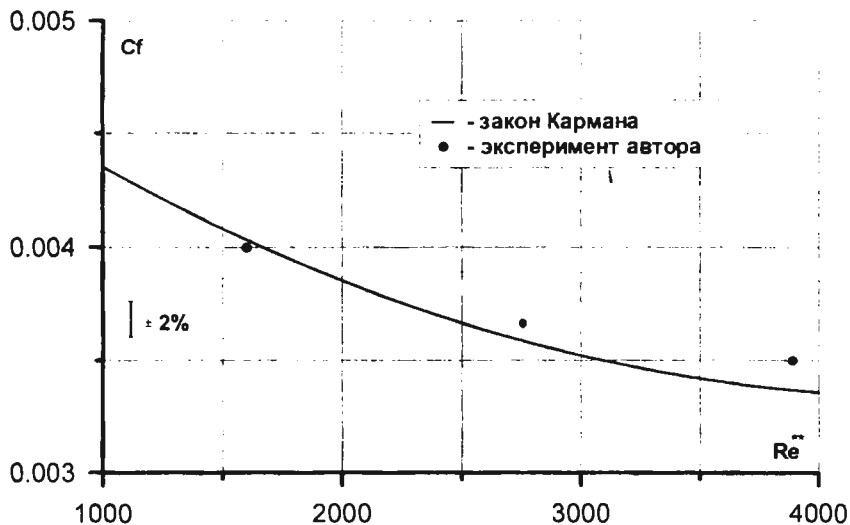


Рис.4. Коэффициент трения в круглой трубе

На втором этапе исследования проводились в потоке, осложненном периодическими колебаниями расхода. Исследования велись в тех же диапазонах чисел Рейнольдса и температурного фактора  $\psi$ , что и на первом этапе.

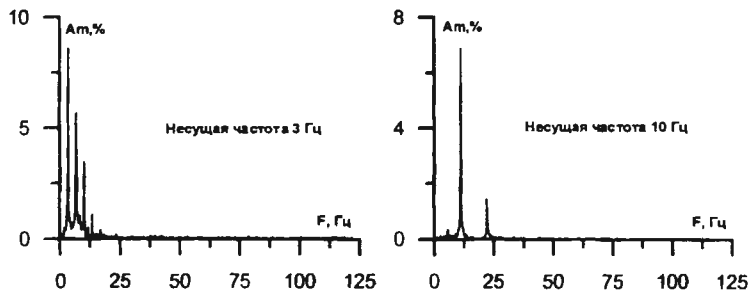


Рис.5. Амплитудно-частотные спектры колебаний скорости потока на оси канала

Характер наложенных колебаний расхода можно оценить, по амплитудно-частотным спектрам колебаний скорости потока на оси канала (рис.5). Несущая частота колебаний лежала в диапазоне от 3 до 10 Гц, а их амплитуда – до 30%.

Если отнести полученные в нестационарном потоке значения, в частности, толщины вытеснения (рис.6) к значениям этой же величины в квазистационарном приближении, можно получить безразмерную относительную толщину вытеснения. На рис.6 приведено изменение этой величины внутри одного периода колебания расхода. Для удобства анализа здесь же нанесена скорость потока на оси канала. Можно видеть, что толщина вытеснения, полученная в нестационарном потоке в стадии замедления, была больше своего квазистационарного значения, а стадии ускорения – меньше. Средние же за период значения совпадали. Аналогично вели себя и остальные интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя.

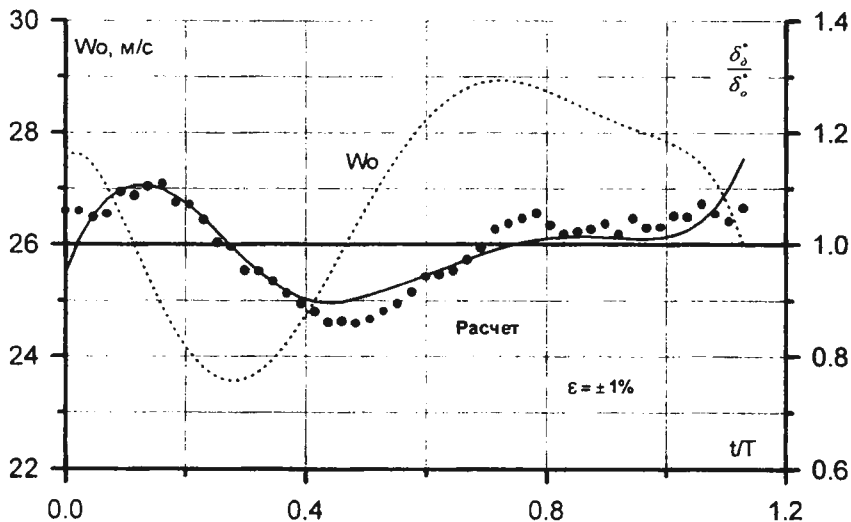


Рис.6. Амплитудно-частотные спектры колебаний скорости потока на оси канала

Если ввести в рассмотрение безразмерный параметр гидродинамической нестационарности:

$$Z = -\frac{\delta}{\tau_w} \cdot \rho \cdot \frac{\partial v_0}{\partial t}, \quad (1)$$

то оказывается, что при определенных условиях (о них будет сказано ниже) можно добиться корреляции этого параметра с относительными: толщиной вытеснения (рис.7), толщиной потери импульса, формалпараметром, коэффициентом трения, а также интегралом безразмерного профиля осредненного квадрата турбулентной составляющей скорости потока. При этом отмечено, что в исследованном диапазоне температурного фактора,

влияние неизотермичности, как в стационарном, так и в нестационарном турбулентном потоке на интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя было одинаково. При этом влияние наложенных колебаний расхода было более существенным.

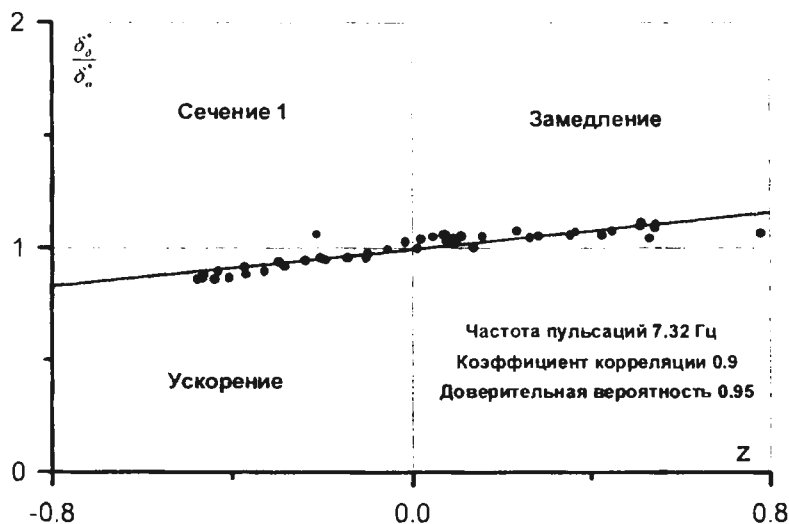
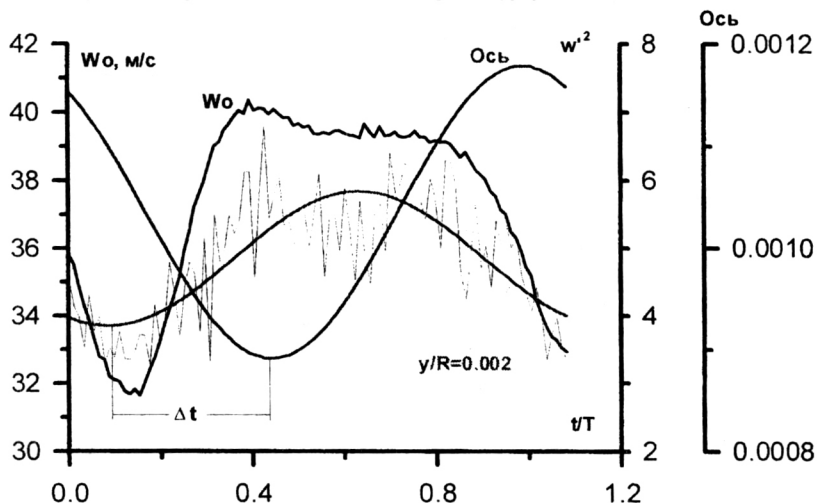


Рис.7. Зависимость относительной толщины вытеснения от параметра  $Z$

С вероятностью 0.95 можно было сказать, что данные коррелированы и подчиняются линейной зависимости, коэффициенты которой были найдены методом наименьших квадратов. Если теперь произвести обратный перерасчет интегральных характеристик пограничного слоя по  $Z$ , можно получить их мгновенные значения внутри периода колебания расхода, что и является необходимым при проведении проектных расчетов. На рис.6 результаты расчета показаны сплошной линией. Можно отметить удовлетворительное, в пределах  $\pm 1\%$ , взаимное согласование эксперимента и расчета.

Следует отметить, что представленный подход будет хорошо работать применительно к турбулентным потокам, осложненным аperiодическим изменением расхода (наброс, сброс). В потоках же, осложненных периодическими колебаниями расхода, немногочисленными исследователями был отмечен эффект «памяти» течения, суть которого заключалась в том, что поток помнил свое предшествующее состояние. Так, в точке минимума расхода поток некоторое время продолжал вести себя как замедленный. Внешне это проявлялось в том, что, в частности, толщина вытеснения при переходе от фазы замедления к

фазе ускорения продолжала оставаться больше своего квазистационарного значения, а при переходе от ускорения к замедлению – меньше. В этом случае корреляция относительной толщины вытеснения с параметром, содержащим производную скорости потока на оси канала по времени, например  $Z$ , невозможна. Отсутствие корреляции не давало возможности производить дальнейшее обобщение результатов исследований и вообще затрудняло понимание процессов происходящих в нестационарных турбулентных потоках.



**Рис.8. Осредненный квадрат пульсационной составляющей скорости потока внутри периода колебания расхода на разных расстояниях от стенки канала**

В настоящих исследованиях эффект «памяти» течения был также отмечен. Однако, говоря об условиях достижения корреляции относительных интегральных величин с параметром  $Z$ , здесь был реализован один прием. Оказалось если сдвинуть по фазе в сторону опережения на промежуток времени  $\Delta t$  изменение, в частности, толщины вытеснения, определенной в нестационарном турбулентном потоке относительно изменения ее квазистационарного аналога, то можно добиться коррелированности относительной толщины вытеснения и параметра  $Z$ . Данный промежуток времени оказался одинаков для всех интегральных характеристик турбулентного пограничного слоя. Анализ турбулентной структуры течения показал, что данный фазовый сдвиг имел под собой физический смысл.

Рассмотрим поведение осредненного квадрата турбулентной составляющей скорости потока  $\langle w'^2 \rangle$  внутри периода колебания расхода на разных расстояниях от стенки канала (рис.8). Можно видеть, что в области перемежаемости данная величина колеблется синфазно со скоростью потока на оси канала. С удалением от стенки синфазность нарушается в сторону отставания и наибольшее отставание по фазе достигается на оси канала. Такое поведение осредненного квадрата пульсационной составляющей скорости потока напоминает распространение возмущения от стенки канала до его оси. Если принять во внимание закон сохранения энергии и опереться на турбулентную теорию вихревых трубок, то можно предположить, что отмеченный процесс является не чем иным, как перестройкой вихревой структуры течения под влиянием внешних условий.

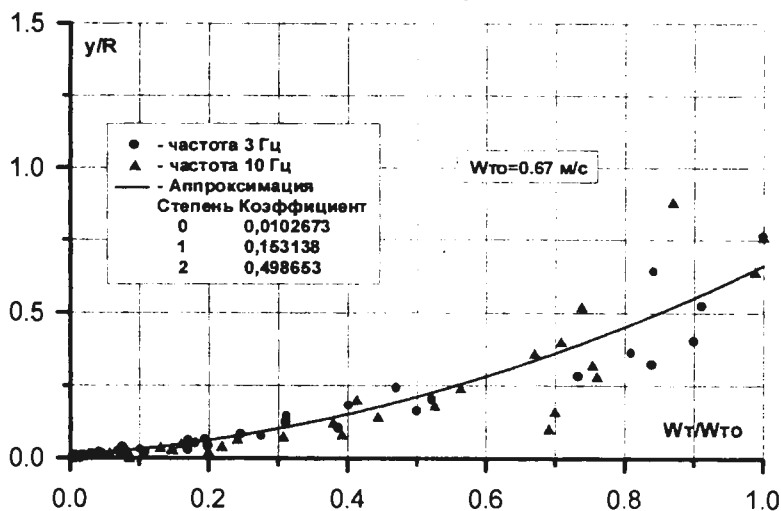


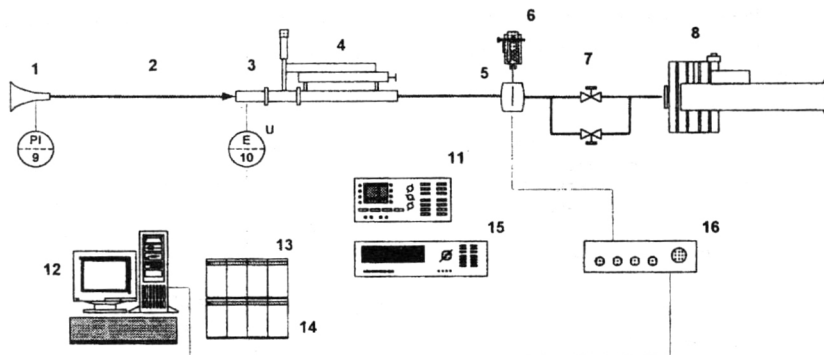
Рис.9. Безразмерный профиль скорости обновления турбулентности

Оказалось, что промежуток времени  $\Delta t$  - есть время, за которое перестройка турбулентной структуры течения произойдет по всему сечению канала. Неучет этого промежутка времени при проведении анализа разрушает корреляцию относительных интегральных характеристик пограничного слоя с параметром  $Z$ . Если отнести радиус канала к указанному промежутку времени, можно получить скорость обновления турбулентности. На рис.9 представлен безразмерный профиль скорости обновления турбулентности для всех исследованных частот наложенных колебаний расхода как в изо-, так и в неизотермиче-



ских потоках. В пределах разброса экспериментальных данных можно отметить одинаковость профиля скорости обновления турбулентности.

Исследования в конфузорных каналах проводились на специально разработанном газодинамическом стенде разомкнутого типа, схема которого представлена на рис. 10.



1 – сопло Витошинского, 2 – участок начальной стабилизации потока, 3 – коническое сопло, 4 – координатный стол, 5 – профилированная заслонка, 6 – привод пульсатора, 7 – байпас, 8 – центробежный насос, 9 – датчик дифференциального давления «Сапфир», 10 – термоанемометр, 11 – осциллограф, 12 – персональный компьютер, 13 – нормирующие усилители, 14 – УСО, 15 – цифровой вольтметр, 16 – источник постоянного тока для маркера.

**Рис.10. Схема экспериментальной установки**

Методики проведения исследований оставались такой же, как и в предыдущей серии исследований. В коническом конфузоре поля скорости определялись в трех его поперечных сечениях, в конфузоре Витошинского – в его горле.

В данной серии исследований помимо параметра гидродинамической нестационарности  $Z$  для обобщения влияния отрицательного продольного градиента давления на интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя был использован еще один безразмерный параметр, полученный из уравнения движения:

$$\lambda = -\frac{\delta}{\tau_w} \cdot \rho \cdot w_0 \cdot \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (2)$$

Исследования в стационарном турбулентном потоке показали, что отрицательный продольный градиент давления приводит к уменьшению безразмерной толщины вытеснения  $\delta^*/R$  и толщины потери импульса  $\delta^{**}/R$ , а также к росту коэффициента трения  $C_f$ . Кроме того, отрицательный продольный градиент давления подавлял турбулентные пульсации скорости в турбулентном пограничном слое, за областью перемежаемости.

Следует отметить, что при проведении данной серии исследований влияние наложенных периодическими колебаниями расхода на указанные выше интегральные величины удалось обобщить, используя параметрический подход с учетом динамических характеристик турбулентного пограничного слоя, реализованный при проведении исследований в конической трубе. Было замечено, что увеличение по абсолютной величине отрицательного градиента давления в коническом сопле приводило к усилению эффектов, наложенных наложенными периодическими колебаниями расхода. Так, к выходу из сопла отмечать увеличение наклона прямой, связывающей параметр  $Z$  и относительную величину вытеснения (рис.11). В тоже время, видно, что диапазон самого параметра  $Z$  к выходу из сопла также уменьшается, что уменьшает и степень его влияния на относительную интегральную величину.

Таким образом, можно сделать вывод, во-первых, о том, что параметр  $Z$  корректно описывает подобные ситуации и может действительно использоваться как обобщающий при рассмотрении нестационарных течений, а во-вторых, что отрицательный продольный градиент давления ослабляет эффекты, вызванные гидродинамической нестационарностью течения.

В результате проведенных исследований удалось установить, что частота колебаний расхода также как и их амплитуда оказывает влияние на интегральные характеристики турбулентного пограничного слоя. Так, увеличение частоты наложенных колебаний расхода приводило к уменьшению степени влияния колебаний на интегральные величины.

При проведении исследований в конфузурных каналах была замечена одна важная особенность. Время обновления турбулентности по сечению канала оказалось постоянной величиной, не зависящей от диаметра сечения. Таким образом, геометрическое сужение канала приводило к увеличению скорости обновления турбулентности. Безразмерная же скорость, то есть скорость, отнесенная к скорости обновления на оси канала оставалась постоянной. В этой связи важно отметить, что если период наложенных колебаний расхода окажется меньше времени, необходимого для обновления турбулентной структуры течения по всему сечению канала, эффекты, вызванные колебаниями расхода, будут наблюдаться не по всему сечению, а только в его части. Дальнейший рост частоты колебаний может вообще привести к эффекту замораживания турбулентности, что было отмечено в ряде работ. Подтверждение сказанному было получено в результате исследований коэффициента расхода сопла Витошинского, который определялся интегрированием профиля скорости в его горле. Исследования были проведены в развивающемся турбулентном пограничном слое в горле сопла.

Поскольку воздух поступал в сопло из комнаты, пограничный слой, как показали исследования, нарастал плавно и в горле сопла его толщина не превышала 10% радиуса. В остальной области течение было ламинарным. Обновление турбулентной структуры происходило в узкой области за время много меньшее, чем период наложенных колебаний расхода. Это определило отсутствие временного сдвига  $\Delta t$  (рис.8) и корреляцию с безразмерным параметром  $K_I$  относительного коэффициента расхода сопла.

$$K_I = \frac{\nu}{w_0^3} \cdot \frac{dw_0}{dt} \quad (3)$$

При этом погрешность от использования квазистационарных значений коэффициента расхода не превышала внутри периода 0.2%. Таким образом, сопло Витошинского в указан-

ном диапазоне погрешности могло служить образцовым средством для измерения как мгновенных, так и осредненных по времени значений расхода несжимаемой жидкости.

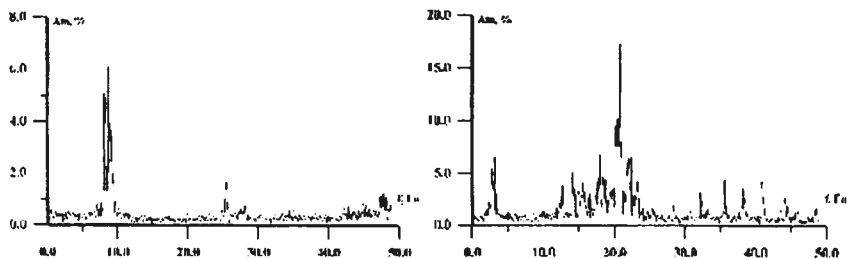
Таблица 1

Наименование узла учета природного газа	Ду, мм	Расход, лм куб/сут	Дисперсия ΔР, %	Систематическая погрешность, %	Годовая стоимость неучтенного продукта, \$
<b>Поставщики</b>					
Балашов, Струна №1	700	72057600	1.597696	0.2007	326075
Балашов, Струна №2	700	74822400	2.064969	0.2598	404397
Петровск, БЛД-2	700	52444800	67.634176	11.4305	12394021
Петровск, БЛД-3	700	40435200	16.621929	2.1962	2572176
Петровск, БЛД-4-1	700	52444800	0.499849	0.0626	142800
Петровск, БЛД-4-2	700	52963200	0.499849	0.0626	143982
Павловка	700	53654400	0.0576	0.0072	15889
Писаревка, Петровск-Новопсков	700	52444800	0.000441	0.0001	125
Писаревка, Уренгой-Новопсков	700	52444800	0.000784	0.0001	222
Сохрановка, Струна 2	700	52444800	0.125316	0.0157	35522
Сохрановка, Струна 3	700	52444800	0.044944	0.0056	12737
Зайнск, ГРС-2, Н-1	250	5581440	0.3025	0.038	9274
Зайнск, ГРС-2, Н-4	250	6039360	0.3249	0.041	10827
Зайнск, ГРС-2, Н-5	250	7810560	0.36	0.045	15369
Наб. Челны, ГРС	250	9210240	0.2601	0.033	13290
<b>Потребители</b>					
АО НКНХ, цех №4	100	587520	4	0.506	12999
АО НКНХ, 1/3	100	34560	0.511225	0.064	97
АО НКНХ, 1/522	100	34560	0.6084	0.076	115
АО НКНХ, 2/640	100	34560	0.5041	0.063	95
АО НКНХ, П/0736	100	34560	0.4761	0.06	91
АО НКНХ, 5314	100	34560	0.519841	0.065	98

Приведенные выше результаты в совокупности с исследованиями характера течения, реализуемого на натуральных узлах учета расхода природного газа, которые были выполнены в рамках данной работы, составили основу следующего этапа исследования. Было установлено, что течение на реальных узлах учета носит турбулентный характер и осложнено периодическими колебаниями расхода. Исследования были проведены на узлах учета, входящих в состав транспортных трубопроводов Югтрансгазовской и Таттрансгазовской групп, а также ряда промышленных предприятий Татарстана (таблица 1).

Следует сказать, что по данным РАО Газпром примерно в 80% случаев от общего количества узлов учета для измерения расхода жидкостей и газов используется метод переменного перепада давления, а в качестве сужающего устройства - стандартная диафрагма.

ма. Характерные амплитудно-частотные спектры колебаний перепада давления на диафрагме, выявленные в результате настоящих исследований, приведены на рис.12. Исследования проводились с помощью специально разработанного и изготовленного портативного измерительного комплекса, на базе персонального компьютера типа IBM PC. Комплекс использовался вместе с датчиком ДМИ, адаптированным под давления, реализуемые на реальных трубопроводах. Комплекс прошел испытания во Всероссийском научно-исследовательском институте расходомерии (ВНИИР).

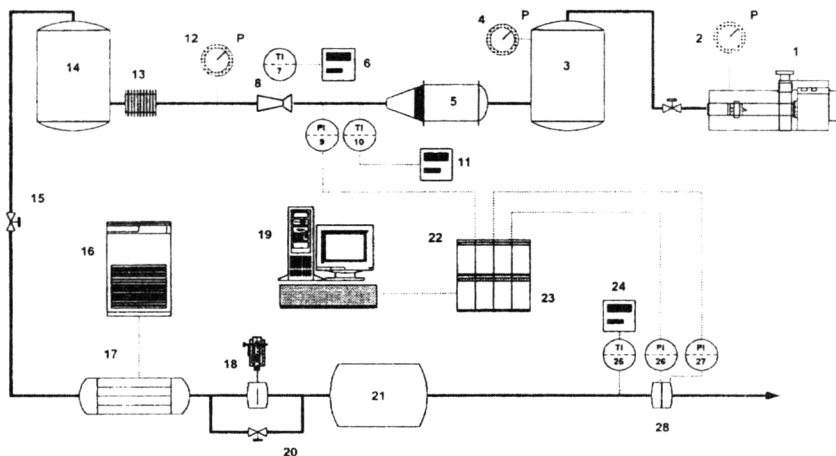


**Рис.12. Характерные спектры колебаний перепада давления на диафрагме (результаты натурных исследований)**

Следует сказать, что Правила РД 50-213-80 и новый, введенный на их замену с 1 октября 99 года ГОСТ 8.563.1÷3, регламентируют порядок измерения и вычисления расхода жидкостей и газов на территории РФ. Данные документы рассчитаны, на применение в стационарных турбулентных потоках. Величины же погрешностей, которые могут возникнуть от применения положений данных документов в условиях реальных течений до настоящего времени не определены, да и вообще вызывают у многих сомнения.

В результате исследований было также установлено, что участок диафрагмирования реальных узлов учета работает в условиях неизотермичности течения, так как температура окружающей среды подвержена более существенным колебаниям, чем температура грунта, в котором залегают трубопровод. Учитывая остроту ситуации, которая складывается между поставщиками и потребителями, в частности, природного газа от небалансов, возникающих при взаиморасчетах, была предпринята попытка анализа влияния наложенных периодических колебаний расхода и неизотермичности течения на метрологические характеристики стандартной диафрагмы. Для решения поставленной задачи на базе ВНИИР была разработана газодинамическая установка, схема которой представлены на рис.13. Установка имела две линии: образцовую и поверяемую. На образцовой линии был установ-

лен критический расходомер (плакат 29) – труба Вентури, которая работала на закритическом перепаде давления. На поверяемой линии был установлен стандартный узел диафрагмирования. Все используемые расходомеры были предварительно поверены в региональном метрологическом центре.



1 – воздушный компрессор, 2, 4, 12 – стрелочные манометры, 3, 14 – ресиверы, 5 – форкамера с соплом Вентури, 6, 11, 24 – цифровые контроллеры температуры UM-350, UT-550 и UP-750 соответственно, 7 – лабораторный термометр, 8 – труба Вентури, 9 – датчик абсолютного давления типа «Сапфир», 10, 25 – хромель-капелевые термопары, 13 – компенсационный фланец, 15 – регулирующий вентиль, 16 – силовой щит, 17 – печь, 18 – пульсатор, 19 – персональный компьютер, 20 – байпас, 21 – форкамера с хонейкомбом, 22 – нормирующие усилители, 23 – УСО, 26 – датчик дифференциального давления ДМИ, 27 – датчик дифференциального давления типа «Сапфир», 28 – узел диафрагмирования.

**Рис.13. Схема экспериментальной установки**

Основная идея установки заключалась в том, что колебания расхода, создаваемые вращающейся вокруг своей оси заслонкой не передавались вверх по потоку через критический расходомер, поскольку в его горле реализовывалась поверхность прямого скачка. Это обеспечивало работу расходомера в стационарных условиях и позволяло использовать его как образцовый. Диафрагма же воспринимала колебания расхода и работала в нестационарном потоке.

Перед выполнением основных исследований методики измерений расхода отлаживались на тестовых экспериментах. По их результатам было отмечено удовлетворительное, в пределах  $\pm 0.7\%$  согласование с расчетами, выполненными по ГОСТу.

Суть проведенных исследований заключалась в изучении разницы расходов, определенных с помощью критического и диафрагменного расходомеров. Сличением показаний расходомеров удалось определить дисперсию коэффициента расхода стандартной диафрагмы внутри периода колебания расхода. Этот факт находится в согласовании с результатами исследований, выполненных в трубе и в коническом сопле. Увеличение дисперсии расхода  $\sigma_G'^2$  приводило к росту дисперсии коэффициента расхода диафрагмы  $\sigma_a'^2$ . При этом было отмечено, что данные, полученные на настоящем этапе, удовлетворительно согласовывались с зависимостью  $\sigma_a'^2 = f(\sigma_G'^2)$ , полученной по результатам исследований в соплах (рис.14), что свидетельствует правильности использованного подхода к описанию процесса.

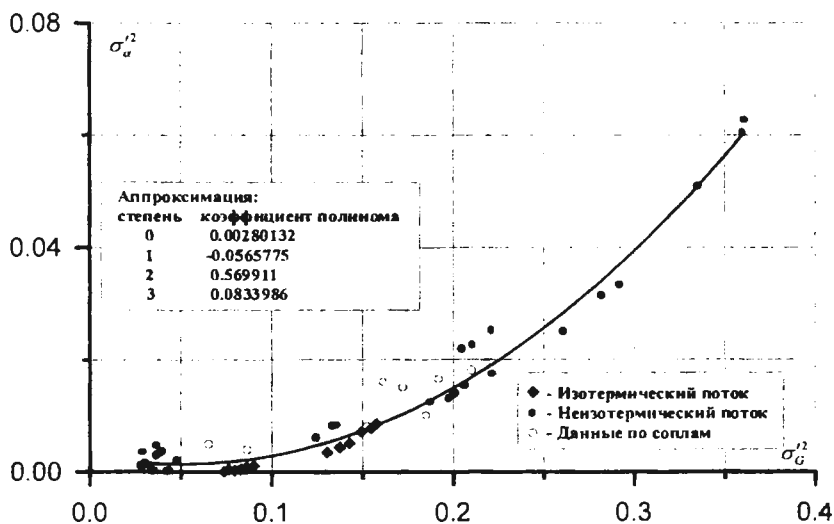


Рис.14. Зависимость безразмерной дисперсии коэффициента расхода сужающего устройства от безразмерной дисперсии расхода

Влияние неизотермичности течения в исследованном диапазоне температурного фактора не меняло общей картины и находилось в пределах экспериментальной погрешности.

Анализ уравнения измерения нестационарного расхода:

$$G_t = \alpha \cdot \rho_0 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0 \cdot P}{T \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot K}} \cdot \sqrt{\Delta P}, \quad (4)$$

показал, что в результате измерения могут присутствовать составляющие погрешности, обусловленные квадратичной зависимостью между расходом и перепадом давления на сужающем устройстве, а также непостоянством коэффициента расхода  $\alpha$  внутри периода колебания. Если коэффициент расхода постоянен по периоду, осреднение его произведения с корнем из перепада давления можно производить отдельно:

$$\langle \alpha \cdot \sqrt{\Delta P_i} \rangle = \langle \alpha \rangle \cdot \langle \sqrt{\Delta P_i} \rangle = \alpha \cdot \langle \sqrt{\Delta P_i} \rangle \quad (5)$$

В противном случае, что было показано в результате данных исследований, возникает дополнительная погрешность, которая в соответствии с правилами математической статистики определяется ковариацией этих двух величин.

$$\langle \alpha \cdot \sqrt{\Delta P} \rangle = \langle \alpha \rangle \cdot \langle \sqrt{\Delta P} \rangle + \text{cov}(\alpha \cdot \sqrt{\Delta P}) \neq \langle \alpha \rangle \cdot \langle \sqrt{\Delta P} \rangle \quad (6)$$

Указанные составляющие погрешности измерения расхода носят систематический характер и должны быть учтены.

Запишем дважды уравнение измерения расхода как:

$$\langle G \rangle = A \cdot \langle \alpha \rangle \cdot \langle \sqrt{\Delta P} \rangle + \text{cov}(\alpha \cdot \sqrt{\Delta P}) \quad (7)$$

$$\langle G^2 \rangle = A^2 \cdot \langle \alpha^2 \rangle \cdot \langle \Delta P \rangle + \text{cov}(\alpha^2, \Delta P), \quad (8)$$

где

$$A = \rho_0 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T_0 \cdot P}{T \cdot P_0 \cdot \rho_0 \cdot K}} \quad (9)$$

масштабный коэффициент. При проведении настоящих исследований диапазон изменения плотности измеряемой среды был таков, что позволял принимать  $A = \text{const}$  без существенного изменения экспериментальной погрешности.

Запишем (7) и (8) следующим образом:

$$\langle G \rangle = A \cdot \langle \alpha \rangle \cdot \langle \sqrt{\Delta P} \rangle \cdot (1 + \text{cov}'(\alpha, \sqrt{\Delta P})) \quad (10)$$

$$\langle G \rangle^2 \cdot (1 + \sigma_G'^2) = A^2 \cdot \langle \alpha^2 \rangle \cdot \langle \Delta P \rangle \cdot (1 + \sigma_\alpha'^2 + \text{cov}'(\alpha^2, \Delta P)), \quad (11)$$

где:

$$\text{cov}'(\alpha, \sqrt{\Delta P}) = \frac{\text{cov}(\alpha, \sqrt{\Delta P})}{\langle \alpha \rangle \cdot \langle \sqrt{\Delta P} \rangle} \quad \text{и} \quad \text{cov}'(\alpha^2, \Delta P) = \frac{\text{cov}(\alpha^2, \Delta P)}{\langle \alpha^2 \rangle \cdot \langle \Delta P \rangle} \quad (12)$$

Введем:

$$\langle G \rangle_1 = A \cdot \langle \alpha \rangle \cdot \langle \sqrt{\Delta P} \rangle \quad \text{и} \quad \langle G \rangle_2 = A \cdot \langle \alpha \rangle \cdot \sqrt{\langle \Delta P \rangle} \quad (13)$$



Здесь  $\langle G \rangle_1$ ,  $\langle G \rangle_2$  - осредненный по времени расход, рассчитанный по осредненному корню из перепада давления и корню из осредненного перепада давления на сужающем устройстве соответственно.

С учетом (13) выражения (10) и (11) примут вид:

$$\langle G \rangle = \langle G \rangle_1 \cdot (1 + \text{cov}(\alpha, \sqrt{\Delta P})) \quad (14)$$

$$\langle G \rangle^2 \cdot (1 + \sigma'_G{}^2) = \langle G \rangle_2^2 \cdot (1 + \sigma'_G{}^2 + \text{cov}(\alpha^2, \Delta P)), \quad (15)$$

Тогда поправка к расходу измеренному с использованием стандартного подхода для (14) и (15) примет следующий вид:

$$\frac{\langle G \rangle}{\langle G \rangle_1} = 1 + \text{cov}(\alpha, \sqrt{\Delta P}) \quad (16)$$

$$\frac{\langle G \rangle}{\langle G \rangle_2} = \sqrt{\frac{1 + \sigma'_G{}^2 + \text{cov}(\alpha^2, \Delta P)}{(1 + \sigma'_G{}^2)}} \quad (17)$$

В результате исследований, проведенных в соплах и в диафрагмах были получены зависимости, связывающие  $\sigma'_G{}^2$ ,  $\text{cov}(\alpha, \sqrt{\Delta P})$ ,  $\text{cov}(\alpha^2, \Delta P)$  с  $\sigma'_G{}^2$ :

$$\sigma'_G{}^2 = 0.00280132 - 0.0565775 \cdot \sigma'_G{}^2 + 0.569911 \cdot (\sigma'_G{}^2)^2 + 0.0833986 \cdot (\sigma'_G{}^2)^3 \quad (18)$$

$$\text{cov}(\alpha, \sqrt{\Delta P}) = -0.00205502 + 0.0690873 \cdot \sigma'_G{}^2 + 0.759815 \cdot (\sigma'_G{}^2)^2 \quad (19)$$

$$\text{cov}(\alpha^2, \Delta P) = -0.010163 + 0.455854 \cdot \sigma'_G{}^2 + 1.20401 \cdot (\sigma'_G{}^2)^2 \quad (20)$$

Зависимости были получены при уровне доверительной вероятности 0.95. Зависимость  $\sigma'_G{}^2$  от  $\sigma'_G{}^2$  в качестве примера приведена на рис.14. Таким образом, зная безразмерную дисперсию расхода  $\sigma'_G{}^2$ , становится возможным рассчитать поправку к измеренному значению среднего по времени расхода, обусловленную нестационарным характером течения измеряемой среды. При этом можно отметить, что расход, измеренный традиционными методами, будет больше действительного. В случаях, если речь идет об измерении расхода энергоносителей, принятие в расчет нестационарного характера течения измеряемой среды ставит, таким образом, потребителей энергоносителей в невыгодное положение по сравнению с их поставщиками.

По результатам натурных исследований, а также анализом амплитудно-частотных характеристик преобразователей дифференциального давления, используемых на практике, было установлено, что при измерении расхода в подавляющем большинстве случаев имеет место вычисление расхода  $\langle G \rangle_2$ . В этой связи коррекция расхода должна произво-

дится по (17). Реализация на практике данной зависимости затруднительна, поскольку требуется определять дисперсию расхода, что невозможно без определения мгновенных значений коэффициента расхода сужающего устройства. Однако зависимость удалось адаптировать для практического использования.

Из совместного анализа уравнений (7) и (11) с учетом масштабов составляющих их членов, удалось получить зависимость, определяющую величину поправки к измеренному значению расхода  $\langle G \rangle_2$  относительно его действительного значения  $\langle G \rangle$ :

$$G' = \frac{\langle G \rangle}{\langle G \rangle_2} = \sqrt{\frac{1}{1 + \sigma_{\Delta P}^2}}, \quad (21)$$

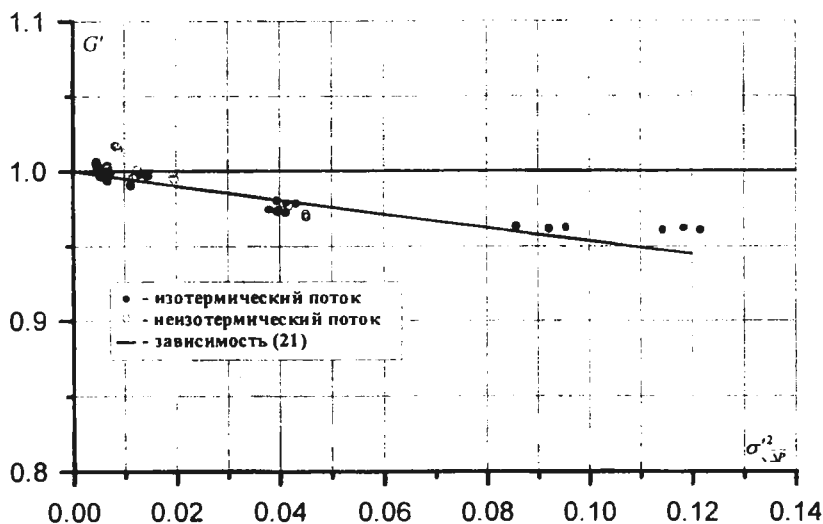


Рис.15. Зависимость поправки  $G'$  от безразмерной дисперсии  $\sqrt{\Delta P}$

На рис.15 произведено сопоставление расчетов по зависимости (21) с результатами проведенных экспериментов. Можно отметить их удовлетворительное взаимное согласование. Видно, что расход, определенный в соответствии с ГОСТ 8.563.1÷3, оказывается больше действительного расхода.

В соответствии с зависимостью (21) и СКО перепада давления, определенными на реальных узлах учета, была посчитана стоимость неучтенного продукта, в данном случае природного газа, для каждого узла учета. Цифры, содержащиеся в таблице 1, свидетель-

вуют о важности проблемы измерения нестационарных расходов, разработки методик и средств их измерения.

Говоря о разработке расходомерных устройств можно отметить, что при использовании средств измерения давления, с достаточными динамическими характеристиками и реализацией соответствующих алгоритмов обработки информации, проблему измерения нестационарных расходов можно будет решить, изучив ее на уровне кинематической структуры потока. Предыдущие исследования показали, что коэффициент расхода сужающего устройства или толщина вытеснения, которая непосредственно связана с этим коэффициентом, непостоянны внутри периода колебания расхода, что определяется отличием мгновенных профилей скорости, определенных в нестационарном потоке от их квазистационарных аналогов.

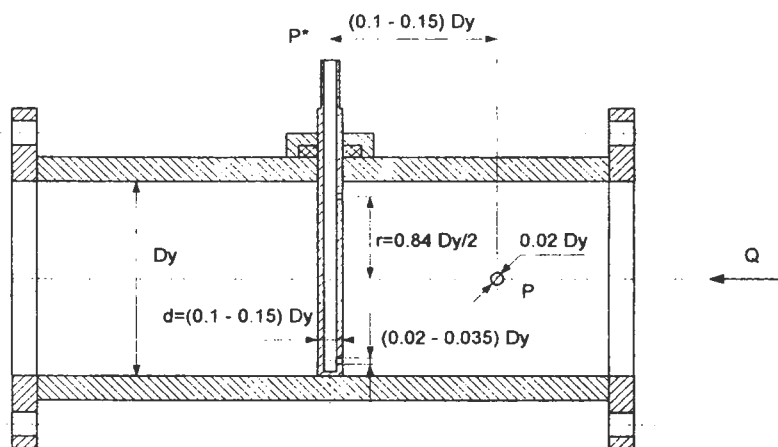


Рис.16. Эскиз рабочего участка с ОНТ

Из анализа уравнений, полуэмпирической теории пограничного слоя следует, что в случаях, когда профиль скорости подчиняется универсальному логарифмическому закону, на нем можно найти точку, в которой скорость потока равна среднерасходной скорости течения. Расчетами установлено, что такая точка находится на расстоянии 0.78 радиуса канала от его оси. Расходомер, измеряющий расход с учетом данной скорости, будет обладать коэффициентом расхода равным единице и, не зависящим от числа Рейнольдса (в пределах справедливости универсального логарифмического закона). Можно предположить, что слабое влияние на коэффициент числа Рейнольдса может положительно ска-

заться на использовании данного расходомера в условиях наложенных периодических колебаний расхода. Данное предположение имеет под собой ряд допущений, связанных с полуэмпирическим характером теории турбулентного пограничного слоя и требует дополнительной экспериментальной проверки.

Для решения поставленной задачи, на базе государственного первичного эталона расхода был разработаны и изготовлены рабочие участки (рис. 16) и проведены соответствующие исследования осредняющих напорных трубок (ОНТ), отборные отверстия давления в которых были выполнены симметрично на расстояниях 0.76 и 0.85 радиуса канала от его оси. К исследованию были приняты два вида трубок, установленных в трубопроводах с внутренним диаметром 50 и 100 мм. Всего четыре рабочих участка.

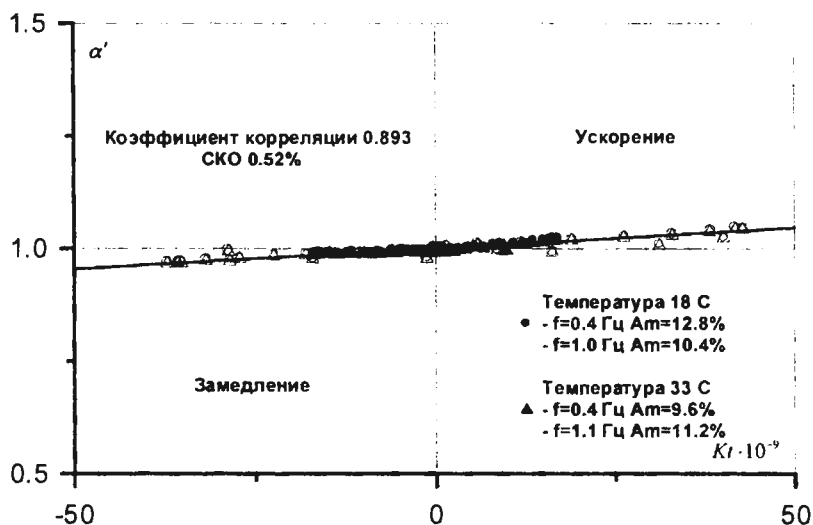


Рис.17. Зависимость относительного коэффициента расхода ОНТ от параметра  $Kt$

В результате исследований с погрешностью не хуже, чем  $\pm 0.15\%$  было показана возможность создания ОНТ с коэффициентом расхода равным единице и независимым от числа Рейнольдса, что подтвердило справедливость расчетов, выполненных в соответствии с полуэмпирической теорией пограничного слоя. Исследования, проведенные на первичном эталоне расхода в нестационарных потоках, не выявили влияния наложенных периодических колебаний расхода на коэффициент расхода ОНТ. Отличие значений осредненных по времени расходов, определенных по эталону и ОНТ находилось в пределах по-

грешности эксперимента  $\pm 0.75\%$ . Исследования проводились для потоков с дисперсией расхода не более 12%. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний расхода приводило к серьезным гидроударам.

Расширение диапазона амплитуд колебаний расхода было выполнено на газодинамическом стенде разомкнутого типа, который являлся модернизацией установки. схема которой представлена на рис.10. В результате было установлено, что колебания расхода с дисперсией, превосходящей уровень 14%, оказывают влияние на коэффициент расхода ОНТ, по характеру схожее с установленным выше (рис.17).

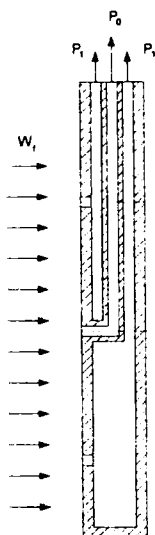


Рис.18

расхода ОНТ. Величина данного влияния меньше влияния, оказываемого периодическими колебаниями расхода.

Проведенный анализ влияния периодических колебаний расхода на коэффициент расхода ОНТ позволил предложить дополнительный отбор давления на оси канала (рис.18). Измерение скорости потока на оси дает возможность определять параметр  $Kt$  и в соответствии с зависимостями, полученными при проведении поверки расходомера, производить коррекцию результата измерения расхода, что делает возможным использование ОНТ в потоках с дисперсией расхода превышающей уровень 14%.

По результатам работы были сделаны следующие выводы:

На данном этапе исследований было также оценено влияние на коэффициент расхода ОНТ неизоотермичности течения. При этом, результаты расчетов, проведенных в соответствии с зависимостью (22), полученной исходя из рассмотрения уравнений полуэмпирической теории пограничного слоя, и результаты экспериментов находились в удовлетворительном согласовании.

$$\frac{\alpha_{ОНТ}}{\alpha_{ОНТ0}} = \frac{1 - \psi^{0.682}}{\left(1 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{Cf}{2}} \cdot \ln(1 - \bar{r})\right) \cdot \alpha_{ОНТ0}} + \psi^{0.682} \quad (22)$$

Увеличение неизоотермичности течения (увеличение температуры потока) приводило к росту коэффициента расхода ОНТ по сравнению с изотермическим течением. Установлено, что в диапазоне значений температурного фактора, реализуемых на узлах учета природного газа, неизоотермичность оказывает незначительное влияние на коэффициент

- Установлено, что наложенные периодические колебания расхода оказывают влияние на кинематическую структуру турбулентного пограничного слоя в осесимметричных каналах. Данное влияние оказывается как на осредненные, так и на турбулентные характеристики потока и проявляется в их несоответствии квазистационарным значениям.

- Показано, что воздействие, которое оказывают на турбулентный поток периодические колебания расхода, могут сопровождаться эффектом памяти турбулентности. Установлено, что данный эффект вызван процессом обновления турбулентной структуры течения. Процесс характеризуется временем и скоростью обновления турбулентности.

- Впервые показано, что время обновления турбулентности является некоторой константой, зависящей от физических свойств потока и его вихревой структуры.

- Впервые предложена методика обобщения влияния наложенных периодических колебаний расхода, основанная на параметрическом подходе с учетом динамических характеристик турбулентного пограничного слоя.

- На основе изучения совместного влияния наложенных периодических колебаний расхода и неизотермичности течения на кинематическую структуру течения показано, что в диапазонах температурных условий наиболее часто, реализуемых на реальных узлах учета природного газа, неизотермичность не оказывает влияния превосходящего влияния, оказываемого ею в условиях стационарного турбулентного потока.

- Установлено, что течение на участках измерения расхода природного газа в составе реальных узлов учета носит турбулентный характер и осложнено периодическими колебаниями расхода с несущими частотами не превышающими, как правило, 20 Гц.

- Определены основные составляющие погрешности измерения нестационарного расхода с помощью стандартной диафрагмы, обусловленные использованием квазистационарного подхода. Предложены зависимости, позволяющие их учитывать.

- Предложена установка для проведения поверки расходомеров в условиях нестационарных турбулентных течений. Показана возможность применения сопла Витошинского и трубы Вентури, работающей на закритическом перепаде давления в качестве образцовых средств измерения мгновенных и осредненных по времени значений нестационарных расходов.

- Показана возможность создания методики беспроливной нормировки коэффициента расхода ОНТ, основанная на анализе ее геометрии.

- Предложена модель расходомера, выполненная на базе ОНТ, а также методика выполнения с его помощью измерений нестационарных расходов жидкостей и газов.

## Условные обозначения

$P$	- давление
$\Delta P$	- перепад давления
$w$	- скорость
$t$	- температура
$\tau$	- время
$G$	- расход среды
$\alpha$	- коэффициент расхода
$d$	- внутренний диаметр канала
$R$	- радиус канала
$\rho$	- плотность
$\mu$	- динамическая вязкость
$\beta$	- относительная амплитуда колебаний
$f$	- частота колебаний
$T$	- период колебаний
$\sigma$	- среднеквадратическое отклонение
$\varepsilon$	- относительная погрешность
$K_i$	- параметр гидродинамической нестационарности
$\lambda$	- параметр продольного градиента давления
$Z$	- параметр гидродинамической нестационарности
$\delta$	- толщина пограничного слоя
$\delta^*$	- толщина вытеснения
$\delta^{**}$	- толщина потери импульса
$C_f$	- коэффициент трения
$H$	- формпараметр

### Индексы:

$0$	- параметр на оси канала
$w$	- параметр на стенке
$m$	- параметр по среднерасходной скорости потока
$\langle \rangle$	- оператор осреднения

## Список публикаций

1. Юшко С.В. Экспериментальное исследование нестационарного течения газа в соплах. Тепло - массообмен в химической технологии. Казань. 1995. С. 124-131.
2. Юшко С.В. Уравнение для плотности вероятности скорости потока при нестационарном турбулентном течении несжимаемой жидкости в канале переменного сечения. Материалы школы молодых ученых при международной конференции «Математические методы в химии и химической технологии». Тула. 1996. С. 229-230
3. Фафурин В.А., Юшко С.В., Понявин В.И. Газодинамический стенд для изучения нестационарных турбулентных потоков. Материалы школы молодых ученых при международной конференции «Математические методы в химии и химической технологии». Тула. 1996. С. 77-78.
4. Муслимов Р.А., Фафурин В.А., Юшко С.В., Понявин В.И. Измерение нестационарного расхода соплом Витосинского. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. Казань. 1996. № 4. С. 47-52. ISSN 0579-2975.
5. Муслимов Р.А., Фафурин В.А., Юшко С.В., Понявин В.И., Стрельников А.В. Особенности измерения нестационарного расхода соплом Витосинского. Материалы IV-й конференции по интенсификации нефтехимических процессов «Нефтехимия-96». Нижнекамск. 1996. С. 166-168.
6. Muslimov R.A., Fafurin V.A., Yushko S.V. and Ponyavin V.I. Nonstationary flow rate measurement with use of Vtoshibskii nozzle. Russian Aeronautics. № 4. Vol. 39. pp. 43-48. Allerton Press, Inc./New York. ISSN 1068-7998.
7. Юшко С.В. Нестационарное течение газа в соплах. Препринт Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. Казань. 1996. 16 С. ISBN 5-7579-0106-3.
8. Горчев А.И., Голубев Л.Г., Юшко С.В., Агаджанян Д.Р. Нестационарные турбулентные течения с теплообменом в соплах. Материалы научной сессии КГТУ 1998 г.
9. Юшко С.В. Влияние гидродинамической нестационарности на турбулентные характеристики течения в конфузоре. Материалы научной сессии КГТУ 1998 г.
10. Юшко С.В., Понявин В.И. Исследование нестационарного турбулентного течения газа в коническом сопле. Материалы 10-го научно-технического семинара «Внутрикамерные процессы в энергетических установках. Акустика, диагностика». КВАКИУ им. М.Н. Чистякова. С. 69-70. Казань 1998 г.



11. Юшко С.В., Горчев А.И., Агаджанян Д.Р. Нестационарное течение несжимаемой жидкости в коническом сопле. Материалы 10-го научно-технического семинара «Внутрикамерные процессы в энергетических установках. Акустика, диагностика». КВАКИУ им. М.Н. Чистякова. С. 70-71. Казань 1998 г.
12. Юшко С.В., Горчев А.И., Агаджанян Д.Р. Нестационарное течение газа в коническом сопле. Материалы 11-й международной научно-технической конференции по компрессорной технике. С. 117-178. С.-Петербург 1998 г.
13. Понявин В.И., Юшко С.В. Исследование течения газа в коническом сопле. Сборник трудов 11-й международной научной конференции «Математические методы в химии и технологиях». С. 51. Владимир 1998 г.
14. Юшко С.В., Горчев А.И., Агаджанян Д.Р. Нестационарный вязкий подслои в коническом сопле. Сборник трудов 11 международной научной конференции «Математические методы в химии и технологиях». С. 52. Владимир 1998 г.
15. Юшко С.В., Понявин В.И. Исследование нестационарного течения воздуха в соплах. Материалы второй международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Санкт-Петербург 1998 г. С. 177-178.
16. Агаджанян Д.Р., Юшко С.В. Установка для исследования нестационарного течения несжимаемой жидкости с теплообменом в трубах. Тепло-массообменные процессы и аппараты химической технологии. Казань 1998 г. С. 155-159.
17. Юшко С.В., Горчев А.И. Установка для изучения метрологических характеристик расходомеров жидкости в условиях тепловой и гидродинамической нестационарности. Тепло-массообменные процессы и аппараты химической технологии. Казань 1998 г. С. 167-170.
18. Юшко С.В., Агаджанян Д.Р. Установка для изучения течений жидкости в трубах. Материалы научной сессии КГТУ. Казань 1999 г. С. 74.
19. Юшко С.В., Горчев А.И. Измерение нестационарных расходов жидкостей и газов стандартными диафрагмами. Материалы 11-го научно-технического семинара «Внутрикамерные процессы в энергетических установках. Акустика, диагностика». КВАКИУ им. М.Н. Чистякова. С. 37. Казань 1999 г.
20. Юшко С.В., Агаджанян Д.Р. Скорость распространения турбулентности при нестационарном течении воздуха в трубах. Материалы 11-го научно-технического семинара «Внутрикамерные процессы в энергетических установках. Акустика, диагностика». КВАКИУ им. М.Н. Чистякова. С. 39. Казань 1999 г.

21. Юшко С.В., Агаджанян Д.Р. К вопросу о памяти гидродинамически нестационарного турбулентного течения газа в трубе. Школа-семинар молодых ученых и специалистов. РАН. Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. С. 113-115. Казань 1999 г.
22. Юшко С.В., Горчев А.И. Измерение расходов нестационарных сред. Школа-семинар молодых ученых и специалистов. РАН. Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. С. 198-201. Казань 1999 г.
23. Юшко С.В., Горчев А.И., Агаджанян Д.Р. К вопросу об измерении расходов жидкостей и газов стандартными диафрагмами в условиях гидродинамической нестационарности. Известия высших учебных заведений. «Проблемы энергетики». 3-4. Казань 1999г. С. 95-100.
24. Юшко С.В., Горчев А.И. Расходомерные характеристики стандартной диафрагмы при измерении нестационарных расходов. Препринт КГТУ. Казань. 1999г. 20 с.
25. Юшко С.В., Агаджанян Д.Р. Нестационарное течение газа в трубе с нагретой стенкой. Препринт КГТУ. Казань. 1999г. 24 с.
26. Юшко С.В. К вопросу об измерениях нестационарных расходов стандартными диафрагмами. Законодательная и прикладная метрология. № 4. Москва, изд. Госстандарта РФ. С. 25-26. 2000 г. ISSN 0889-575X.
27. Юшко С.В., Крикун А.Н. Влияние периодических пульсаций расхода на коэффициент расхода осредняющей напорной трубки. Известия высших учебных заведений. «Проблемы энергетики». 5-6. Казань 2000г. С. 98-101.
28. Юшко С.В. Расходомерные характеристики стандартной диафрагмы при измерении нестационарных расходов. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. Казань. 2000. № 3. С. 65-68. ISSN 0579-2975.
29. Yushko S.V. Flowmeter characteristics of a standard orifice at the unsteady flow measurement. Russian Aeronautics. № 3. Vol. 43 pp. 98-103. Allerton Press, Inc./New York. ISSN 1068-7998.
30. Юшко С.В. Влияние места расположения отбора давления на коэффициент расхода осредняющей напорной трубки. Известия высших учебных заведений. «Проблемы энергетики». 7-8. Казань 2000г. С. 63-66.
31. Крикун А.Н., Фафурин А.В., Юшко С.В. Коэффициент расхода осредняющих напорных трубок и его зависимость от расхода и гидродинамической нестационарности течений. Препринт КГТУ. Казань. 2000 г. 16 с.

Заказ **143**

Тираж 100 экз.

Офсетная лаборатория Казанского государственного  
технологического университета  
420015, Казань, К. Маркса, 68

2.00